

ISSN 0195 - 0498

**山 口 県**  
**環境保健研究センター業績報告**

**第 23 号**

**(2002)**

山口県環境保健研究センター

# 山口県環境保健研究センター業績報告 (第23号)

## 目 次

### I 原 著

- 福永 健一・富田 正章・澄田 和歌子・歳弘 克史・手島 義人・片山 淳  
ヨツボシトンボの遺伝子解析からみたベッコウトンボの保護 ..... 1

### II 技術報告

- 福田 哲郎・歳弘 克史・大比田 義昭・手島 義人  
ヨシを原料とした活性炭の作製  
— 環境教育への利用 — ..... 5
- 溝田 哲  
パソコンによる水質シミュレーションの可能性について  
— 徳山湾の流動・拡散シミュレーションを例として — ..... 9

# CONTENTS

## I Original Articles

- The Protection plan of *Libellula angelina* on the basis of DNA analysis  
of *Libellula quadrimaculata asahinai* ..... 1  
Kenichi FUKUNAGA, Masaaki TOMITA, Wakako SUMIDA  
Katsushi TOSHIHIRO, Yoshito TESHIMA, Atsushi KATAYAMA

## II Technical Reports

- Preparation of Activated Carbon from Reed  
— Utilization for Environmental Education — ..... 5  
Tetsurou FUKUDA, Katsushi TOSHIHIRO, Yoshiaki O'HITA  
Yoshito TESHIMA
- The Possibility of Water Quality Simulation with a Personal Computer  
— An Example of Simulation in Tokuyama Bay — ..... 9  
Satoshi MIZOTA

# ヨツボシトンボの遺伝子解析からみたベッコウトンボの保護\*

山口県環境保健研究センター

福永 健一・富田 正章・澄田 和歌子・歳弘 克史・手島 義人・片山 淳

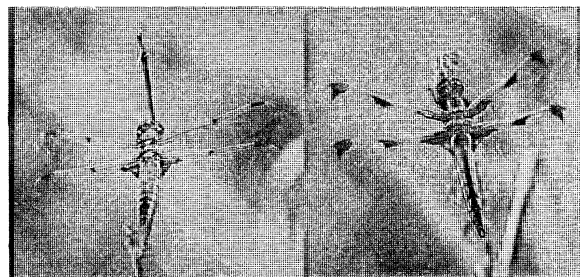
## The Protection plan of *Libellula angelina* on the basis of DNA analysis of *Libellula quadrimaculata asahinai*

Kenichi FUKUNAGA, Masaaki TOMITA, Wakako SUMIDA, Katsushi TOSHIHIRO  
Yoshito TESHIMA, Atsushi KATAYAMA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Public Health

### 1 はじめに

ベッコウトンボ (*Libellula angelina*) は絶滅危惧 I 類 (CR+EN) であり「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」に指定されており、山口県を含め全国でも数県のみになんか生息していない。そこで、著者らの 1 人、福永は、このベッコウトンボが生息する池沼の生息環境を数量化理論 (II 類, III 類) を用いて解明し、ベッコウトンボ個体群の保全を提唱した<sup>1)</sup>。一方、ベッコウトンボの保全には種の保存という観点から遺伝子解析も有用な手段と考えられるが、ベッコウトンボは法的に捕獲が難しい。そこで、ベッコウトンボと①同属種、ほぼ同一の生息環境、同時期に出現する、②種間雑種個体<sup>2)</sup>を形成する、③県下各地に生息すること等でヨツボシトンボ (*Libellula quadrimaculata asahinai*) を選定すると同時に、生息地域を山口県の瀬戸内側、山間地及び日本海側に大別し、その遺伝子解析をもとに遺伝子多様性の側面からベッコウトンボの保護について検討した。



ヨツボシトンボ (♂) ベッコウトンボ (♂)  
図 1 ヨツボシトンボとベッコウトンボの姿態写真

6 頭/箇所を 2002 年 5 月 8 日~24 日に捕獲した。

なお、選定した池沼は表 1 に示すように広さ、水草の種類等多様な特性を有する池沼環境である。

### (3) DNA の抽出と RAPD 解析

遺伝子分析において、簡単に、しかも短時間で DNA を増やす方法として、PCR 法という方法が開発された。

### 2 方法

#### (1) ヨツボシトンボ (♂) とベッコウトンボ (♂) の姿態

図 1 にヨツボシトンボとベッコウトンボの姿態写真を示す。ヨツボシトンボは 2001 年 4 月 26 日に、ベッコウトンボは 2001 年 5 月 4 日に撮影したものである。

#### (2) 捕獲池沼

図 2 に捕獲池沼を示すが、山口県の瀬戸内側の秋穂町 A と B 池沼、山間部の美祢市の C 池沼と福栄村の D 池沼及び日本海側の豊浦町の E 池沼と田万川町の F 池沼、計 6 箇所においてヨツボシトンボ (♂) 5~

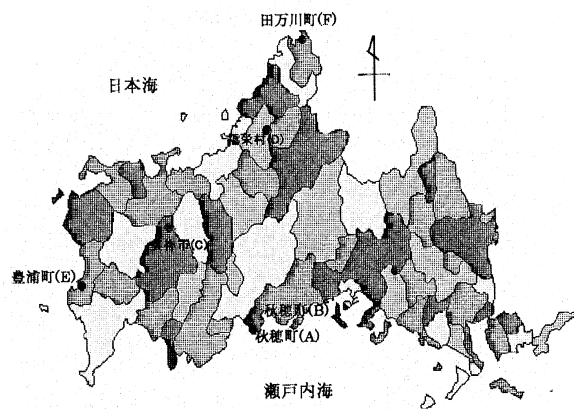


図 2 捕獲池沼

\*本報告の要旨は、2002 年度日本蜻蛉学会 (2002 年 11 月・東京都) において発表した。

表1 捕獲池沼の特性

生息地域	池沼名 (所在市町村)	広さ (㎡)	深さ (cm)	水草の種類	水草 繁茂率 (%)	水質	
						PH	COD (mg/L)
瀬戸内側	A池沼 (秋穂町)	1,300	85	スイレン, ヨシ	80	5.6	5.2
	B池沼 (秋穂町)	2,700	40	ヒメガマ (一部ヨシ)	80	6.6	8.4
山間地	C池沼 (美祿市)	2箇所×100	30~100	ガマ (陸地化) ヒシ	95	6.9	4.4
	D池沼 (福栄村)	300	40	ヒメガマ (ガマ間にヒルムシロ)	95	6.9	4.1
日本海側	E池沼 (豊浦町)	6,700	20 (水草部分)	フトイ	12	7.2	3.9
	F池沼 (田万川町)	12,500	50 (水草部分)	フトイ, サンカクイ	10	6.4	4.7

これは一つのDNA断片をわずかな時間で多量に増やすという画期的な方法である。このPCR法の一種であるRAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) 法を用い、ヨツボシトンボの胸部組織からDNeasy Tissue Kit (Qiagen K. K., Tokyo, Japan) でDNAを抽出し遺伝子解析を行った。

RAPD解析はReady-To-Go RAPD Analysis Beads (Amersham Pharmacia Biotech, England) の仕様書に従い実施した。解析にはプライマーNo.6 (5'-CCCGTCAGCA-3') を用いた。PCR (Polymerase Chain Reaction) 産物は3%アガロースで泳動後、エチジウムブロマイドで染色し、Gel Dog System (日本バイオ・ラッドラボラトリーズ(株), 東京) を用いて群平均法 (UPGMA (unweighted pair-group method using arithmetic averages)) によるクラスター分析で泳動パターンの類似度を測定した。

#### (4) クラスター分析

クラスター分析とは、異なる性質のもの同士が混ざり合っている集団 (対象) の中から、互いに似たものを集めて集落 (クラスター) を作り、集団 (対象) を分類しようという方法を総称したものであり、数値分類法とも呼ばれる。クラスター分析には、様々な方法が提唱されているが、ここでは階層的手法の中の群平均法を採用した。群平均法では、全てのデータ間の距離を計算しクラスターを形成していく。この距離が小さいほど良く似ていることになる。クラスター分析を用いることで、サンプル間の類似性や分類を簡単に調査できる。

### 3 結果及び考察

各捕獲池沼間距離を表2に、RAPD法で得られたヨツボシトンボの遺伝子パターンのクラスター分析を図3に示す。

表1, 表2及び図3のデータを用い種々検討した結果、以下のことが想定できる。

- (1) ヨツボシトンボにおける遺伝子の多様性を解析する方法として、酵素反応を利用して遺伝子 (DNA) を試験管内で増幅させることができるPCR法の一種であるRAPD法は有効な分析手法の一つである。
- (2) 基本的には、遺伝子パターンは生息池沼毎に相違しているが、詳細にみると、ヨツボシトンボの遺伝子パターンは、ほぼ3つのグループ①D1~E1, ②A1~C5及び③E2~E5に分類することができる。①のグループは、福栄村の池沼 (D池沼), ②のグループは、秋穂町の池沼 (A池沼, B池沼) 及び美祿市の池沼 (C池沼), ③のグループは日本海側池沼すなわち、豊浦町の池沼 (E池沼) 及び田万川町の池沼 (F池沼) が主体となっている。

すなわち、美祿市における池沼のヨツボシトンボ遺伝子パターンは、瀬戸内側の池沼 (秋穂町) に近似している。また、日本海側の池沼 (豊浦町, 田万川町) は距離的に約85kmと離れているのに遺伝子パターンは近似している。

- (3) E池沼 (豊浦町) のヨツボシトンボ5頭の内、1頭が①のグループのクラスターに入っている。これが倉ら<sup>3)</sup>が言う池沼内での亜個体群の形成であると思われるが、その理由の一つとして、捕獲池沼は6,700㎡と広さは中規模であるが付近に当該池沼を含み11池沼が点在し、この影響により羽化水域や繁

表2 捕獲池沼間距離

池沼名	A池沼 (秋穂町)	B池沼 (秋穂町)	C池沼 (美祢市)	D池沼 (福栄村)	E池沼 (豊浦町)	F池沼 (田万川町)
A池沼 (秋穂町)		2	35	49	49	72
B池沼 (秋穂町)	2		33	47	48	71
C池沼 (美祢市)	35	33		35	29	57
D池沼 (福栄村)	49	47	35		64	24
E池沼 (豊浦町)	49	48	29	64		85
F池沼 (田万川町)	72	71	57	24	85	

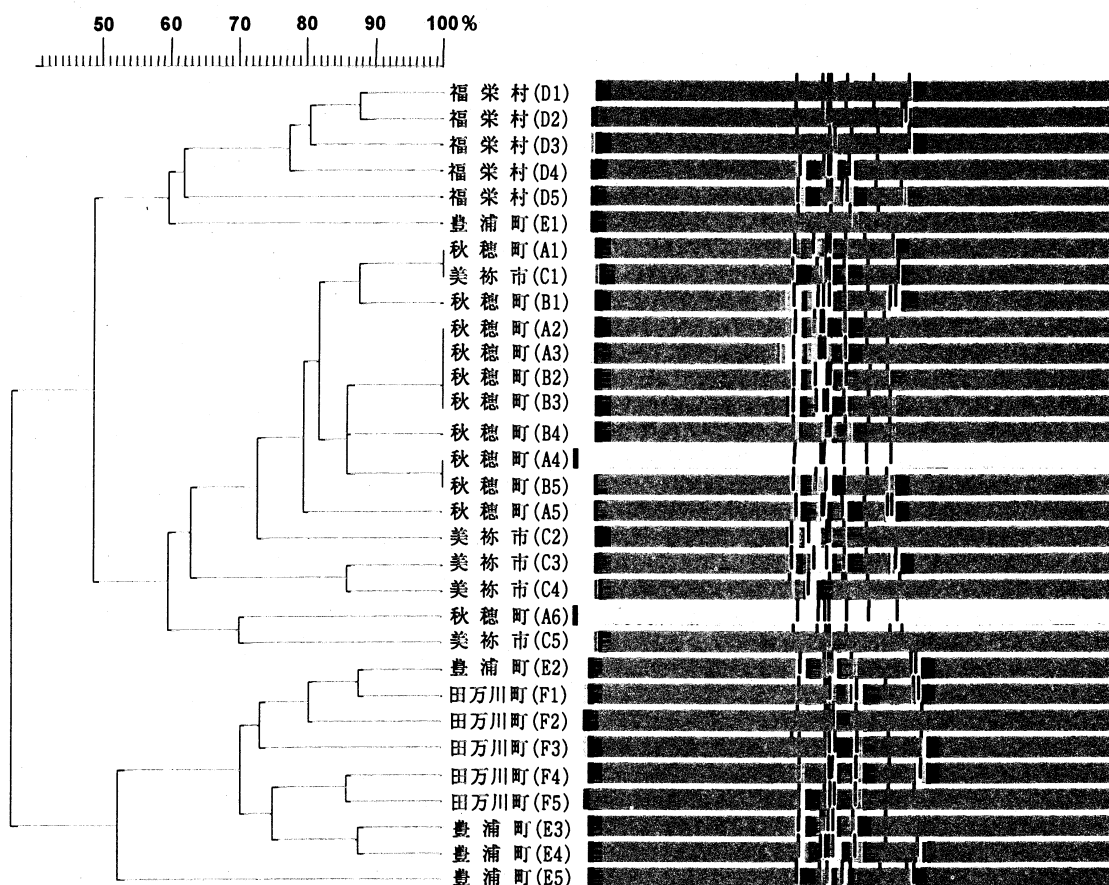


図3 各池沼におけるヨツボシトンボのクラスター分析

殖行動水域が異なることから遺伝的に多様性にとんだヨツボシトンボが維持されていると考えられる。

なお、この1頭は翅が黒帯型でもなく、福井が指摘するベッコウトンボとの種間雑種個体<sup>2)</sup>でもない。

(4) 同一池沼でのヨツボシトンボは、ほぼ同じクラスターを形成する傾向にあり、特に、D池沼におけるヨ

ツボシトンボ5頭の遺伝子は類似性が高くなっている。言い換えれば、遺伝子が多様性を失い、均一化していることを示している。この理由の一つとして、池沼の広さが300㎡と狭いことが考えられる他、1回の調査であったことから兄弟同士を捕獲したことも否定できないので継続して調査する必要性を認める。

- (5) 各池沼のヨツボシトンボ遺伝子の相違が、広さ、深さ、植生の状態及び水質等の要因に影響されているのかどうかは、現在のところ不明である。
- (6) ヨツボシトンボとベッコウトンボとの間に種間雑種個体<sup>2, 4)</sup>をつくることから両種間には、ほとんど共通の遺伝子を持つと仮定できる。このことと上記(1)～(5)の結果から推察すると、ベッコウトンボについて以下のことが言える。

山口県のベッコウトンボの生息地は、中部から西部にかけての瀬戸内側に5池沼あり距離的に最大で28km以内に収まっているため、遺伝的には近似性が高い地域個体群を形成しているものと考えられる。また、生息池沼の広さは最大で約2万m<sup>2</sup>であり亜個体群を形成する可能性は低いため、これら池沼の一つにベッコウトンボの絶滅が起これば、近くの池沼に新たな遺伝子注入が出来なくなり、遺伝子の均一化がおこるとともに、福永が2001年に調査研究した<sup>1)</sup>植生の遷移化の進行とともに連鎖反動的に県下

のベッコウトンボが絶滅する方向に向かうのではないかと懸念される。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、倉品治男先生及び福井順治先生に御助言を戴いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 福永健一「ベッコウトンボの生息環境」：山口県環境保健研究センター業績報告, 22, 44～47 (2001) (2002年第36回 日本水環境学会年会講演集p.344)
- 2) 福井順治「桶ヶ谷沼におけるベッコウトンボの生息条件」昆虫と自然 Vol.32 No.7 6-10 (1997)
- 3) 倉品治男他「ベッコウトンボが減少した原因についての一考察」昆虫と自然 Vol.36 No.7 5-9 (2001)
- 4) 環境庁：日本の絶滅のおそれのある野生生物－レッドデータブック－無脊椎動物編。(初版) p.40 (1992)

# ヨシを原料とした活性炭の作製

## — 環境教育への利用 —

山口県環境保健研究センター

福田 哲郎・歳弘 克史・大比田 義昭・手島 義人

### Preparation of Activated Carbon from Reed — Utilization for Environmental Education —

Tetsurou FUKUDA, Katsushi TOSHIHIRO, Yoshiaki O'HITA, Yoshito TESHIMA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Public Health

#### はじめに

湖沼、河川等の窒素、リンなどの環境基準の達成が困難な中で、ヨシはそれらの水域、湿地帯に生育し、ヨシ帯は鳥類や魚類等の住処、産卵場所、稚魚の成育の場というだけでなく、水質の浄化に役立っている。さらに、ヨシは刈り取るにより富栄養化の防止効果を高めるが、刈り取り後の有効な利用法が少ないこともあって、多くはそのまま放置されている。

一方、循環型社会を目指して廃棄物のリサイクル、再資源化が盛んに試みられているが、その再資源化の方法として廃木材、廃タイヤ、下水汚泥、古紙等の廃棄物から活性炭の製造も行われている。

このような湖沼、河川等の水質浄化、循環型社会の構築などの環境問題にとって、環境教育も重要である。

そこで、これらに関連した環境教育のため、ヨシのひとつの利用法として、劇物でない試薬を用いて簡易にヨシから活性炭を作製し、それを用いて水質浄化実験を行う環境学習プログラムを作成することになっている。本報では、その活性炭の作製方法について検討した。

#### 活性炭の作製方法

##### 1 試料

表1 ヨシの主要組成

成分	成分量 (%)
強熱減量	89.4
Si	3.89
Ca	0.41
Mg	0.16
Na	< 0.01
K	0.86

刈り取ったヨシを室内で乾燥後、短く切断し、さらに、ミキサーで粉末にし、試料とした。その主要組成を表1に示す。強熱減量は89.4%で、ケイ素が3.89%含まれている。

##### 2 炭化並びに賦活法

活性炭の作製に必要な賦活は化学的賦活で行い、賦活剤として水酸化カリウム、炭酸カリウム及びリン酸を用いた。

なお、劇物の水酸化カリウムを用いて作製した活性炭を評価の指標とした。

##### (1) 水酸化カリウム

籾殻<sup>1)</sup>、下水汚泥<sup>2)</sup>等の化学的賦活に劇物の水酸化カリウムを用いてメチレンブルー吸着性能（以下、MB-abs）の高い活性炭が得られている。そこで、ヨシからも良質な活性炭ができるかどうか確認のため、一般的に行われる原料の炭化とその炭化物の賦活との2つの工程を経て活性炭を作製した。その方法と

##### 賦活後の試料

↓  
500mlの熱水に加え、攪拌しながら20分沸騰

↓  
ワットマンGF/Cろ紙で吸引脱水

↓  
残渣物を熱水2Lに加え、1時間攪拌

↓  
冷却後、0.6N塩酸または1N水酸化ナトリウムで中和

↓  
ワットマンGF/Cろ紙で吸引脱水

↓  
130℃で一晩乾燥

図1 賦活後の処理



して、まず試料を磁性ルツボに採り共蓋をした後、電気炉により20℃/min以上の速度(昇温速度、以下同様)で600℃まで昇温し、その温度を1時間保持して炭化した。次いで、磁性ルツボに炭化物3gとその4倍の水酸化カリウムフレークを加えよく混和し共蓋をした後、電気炉により650℃まで昇温し、その温度を10分間保持し賦活処理を行った。その後の洗浄等の処理は図1により実施した。

なお、以下の炭酸カリウム及びリン酸による炭化・賦活後の洗浄等の処理も同様にした。

## (2) 炭酸カリウム及びリン酸

炭酸カリウムあるいはリン酸による活性炭の作製は炭化と賦活を一括して行った。

### ア 炭酸カリウム

#### (ア) 加熱に電気炉を使用

炭化・賦活処理として、磁性ルツボにヨシ13gとその1~4倍の炭酸カリウムを加えよく混和し共蓋をした後、電気炉により800℃まで昇温し、その温度を120分保持する条件下で、MB-absの高い活性炭が得られる炭酸カリウムの添加量を求めた。次いで、その添加量で、炭化・賦活温度(600~900℃)や所定温度の保持時間(30~120分)を検討し、活性炭作製の最適条件を求めた。

#### (イ) 加熱にガラス細工用バーナー使用

実験室に電気炉がない場合を想定して、耐熱性ルツボにヨシ20gとその3倍あるいは4倍の炭酸カリウムを加えよく混和し共蓋をした後、耐熱性ルツボをマッフルで被い、ガラス細工用バーナー(天然ガス使用)を全開し120分加熱する炭化・賦活処理を行い、活性炭を作製した。

なお、ガラス細工用バーナーで加熱する際、最初の15分間は弱火で行った。

### イ リン酸

ヨシとその1~5倍(w/w)量のリン酸を加えよく混和した後、乾燥器で110℃、2時間乾燥した。次いで、その混和物を磁性ルツボに採り共蓋をした後、電気炉により600℃まで昇温し、その温度を120分保持する条件下で、活性炭を作製した。また、800℃においても600℃での炭化・賦活と同様にリン酸の添加量を変え、活性炭作製のための炭化・賦活温度とリン酸の添加量を検討した。

## 3 測定方法

### (1) MB-abs

MB-absはJIS K 1474の活性炭試験方法のメチ

レンブルー吸着性能試験法により求めた。

### (2) 収率

収率は、次の式に従い算出した。

$$\text{収率} = \frac{\text{活性炭の収量}}{\text{ヨシの仕込み量}} \times 100 \quad [\%]$$

## 結果及び考察

環境学習で活性炭を作製する際、原料の炭化とその炭化物の賦活との2つの工程を経るよりこれらを一括して処理する方が作業工程を省略でき、時間の短縮や作業も簡単といった利点がある。また、環境学習には賦活剤に劇物を使用しない方が安全である。

そこで、賦活剤として水酸化カリウムの代わりに炭酸カリウムやリン酸を用いてもMB-absの高い活性炭が得られるかどうか検討した。

### 1 加熱に電気炉を使用

#### (1) 水酸化カリウムによる賦活

化学的賦活は通常400~1000℃の範囲で行われる<sup>3)</sup>なかで、水酸化カリウムによる賦活はやや低温域の650℃を10分間保持することで、活性炭のMB-absは180ml/gとなり、(財)日本環境協会が定めた廃木材等から製造する活性炭のエコマーク認定基準のMB-abs(150ml/g以上)を上回った。一方、収率は6.8%と市販の木質系でいわれている10%程度<sup>1)</sup>より少し低い値になった。

#### (2) 炭酸カリウムによる炭化・賦活

##### ア 添加量の影響

室山ら<sup>5)</sup>は食品廃棄物を原料とした活性炭の製造にあたって、賦活剤として炭酸カリウムを用いた場合、800℃の炭化・賦活温度で良質な活性炭を得ている。

そこで、炭化・賦活温度を800℃とした条件下の炭酸カリウムの添加量と活性炭のMB-abs及び収率との関係を図2に示す。

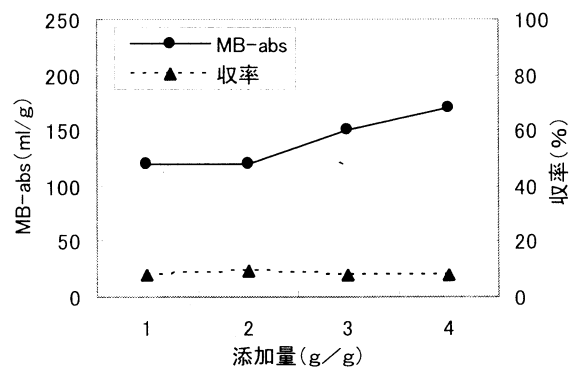


図2 炭酸カリウムによる炭化・賦活時の添加量の影響

MB-absは炭酸カリウムの添加量が増えると高くなる傾向がみられ、ヨシの3倍量の添加で150ml/gとエコマーク認定基準値に一致し、4倍量では170ml/gと水酸化カリウムを賦活剤とした活性炭のMB-absに近いものであった。一方、収率は炭酸カリウムの各添加量において8%前後で、水酸化カリウムを賦活剤とした場合よりやや高くなった。

イ 温度の影響

アの結果から、炭酸カリウムの添加量をヨシの4倍量、所定温度を120分保持する条件下の炭化・賦活温度と活性炭のMB-abs及び収率との関係を図3に示す。

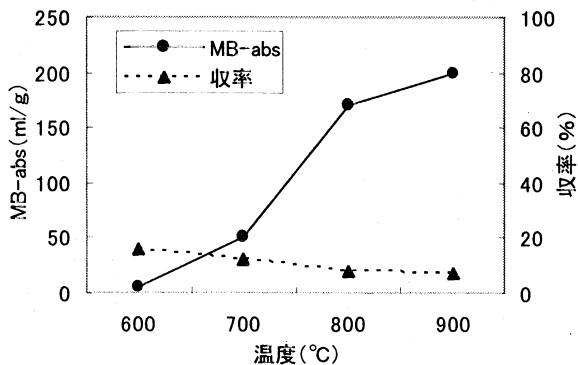
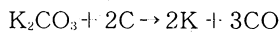


図3 炭酸カリウムによる炭化・賦活時の温度の影響

炭化・賦活温度が700℃を超えると炭酸カリウムが原料の炭化物の炭素により還元され、次式のような反応が起こり、賦活が進むことが報告されている<sup>3)</sup>。



MB-abs は明らかに温度依存性がみられ、800℃以上でMB-absの高い活性炭が得られ、900℃ではMB-absは水酸化カリウムを賦活剤とした活性炭の値を超え、200ml/gとなった。一方、収率は温度が高くなると、MB-absと逆に低下する傾向がみられた。

ウ 保持時間の影響

ア、イの結果から、炭酸カリウムの添加量はヨシの4倍量、炭化・賦活温度はエネルギー消費を考慮し800℃の条件下でその温度の保持時間と活性炭のMB-abs及び収率との関係を図4に示す。

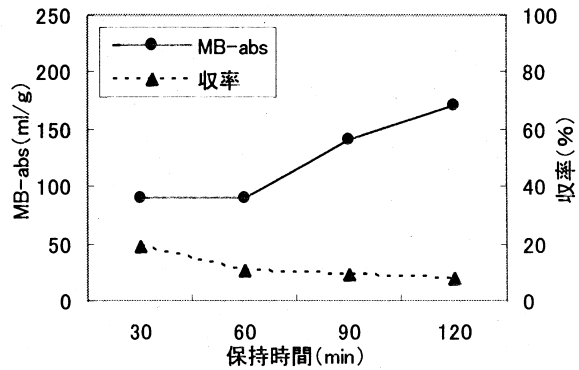


図4 炭酸カリウムによる炭化・賦活時の保持時間の影響

炭酸カリウムの所定温度の保持時間は水酸化カリウムによる賦活の場合に比べ長い時間が必要で、MB-absは120分でエコマーク認定基準値を超えた。一方、収率は保持時間が長くなると、MB-absと逆に低下する傾向がみられた。

以上のことから、活性炭作製の賦活剤として炭酸カリウムを用いる場合、炭酸カリウムをヨシの4倍量ほど加え、炭化・賦活温度800℃で、その温度の保持時間120分とする条件が妥当と思われる。

(3) リン酸による炭化・賦活

リン酸は原料に対して400~750℃の温度で脱水作用、浸食作用がある<sup>3)</sup>。

そこで、炭化・賦活温度600℃と800℃でのリン酸の添加量と活性炭のMB-absとの関係を図5に示す。

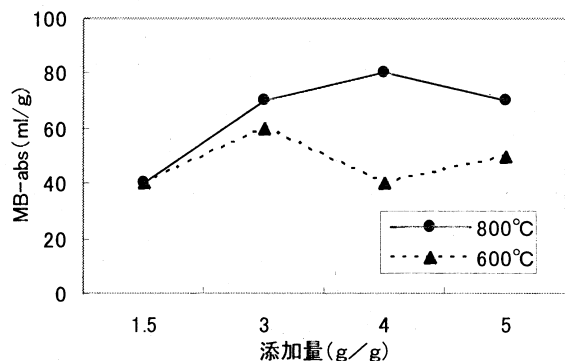


図5 リン酸による炭化・賦活時の温度及び添加量の影響

炭化・賦活温度600℃に比べ、800℃ではリン酸の添加量が3倍を超えるとMB-absは70ml/g程度と高くなる傾向はみられるが、炭酸カリウムを用いた場合よりMB-absは低くなった。一方、収率は600℃、800℃のいずれも40%前後と炭酸カリウムの場

合に比べかなり高くなった。このことは賦活後の洗浄が不十分で活性炭にリン酸が残留していることも考えられ、今後検討が必要と思われる。

これらのことから、環境学習に用いる活性炭作製の賦活剤として炭酸カリウムはリン酸より適し、それを用いた活性炭は市販の木質系の活性炭よりやや収率は低いものの水酸化カリウムを賦活剤とした活性炭と同じように高いMB-abs値を示した。

## 2 加熱にガラス細工用バーナー使用

電気炉で活性炭作製の賦活剤として炭酸カリウムを用いてMB-absの高い活性炭が得られたことから、電気炉の代わりにガラス細工用バーナー（内炎の温度：900～950℃）を使用し、炭化・賦活処理を試みた。その結果、炭化・賦活の温度が高いこともあってヨシの3倍量あるいは4倍量の炭酸カリウムの添加で、ともに活性炭のMB-absは230ml/gと非常に高く、収率はそれぞれ13.8%、6.9%であった。このことから、環境学習に用いる活性炭の作製に、ガラス細工用バーナーも使用できることが明らかになった。

今後、環境学習への利用の幅を広げるために、活性炭の比表面積等も測定することにより、作製した活性炭の詳細な特性を調べる予定である。

## まとめ

水質浄化や循環型社会の構築に関連した環境教育のため、危険性の低い炭酸カリウムやリン酸を用いて簡易にヨシから活性炭を作製する方法（炭化と賦活を一括処理）を検討した。

- 1 ヨシを原料とした活性炭作製の賦活剤として炭酸カリウムはリン酸より適し、それを用いた活性炭は市販の木質系の活性炭よりやや収率は低いものの劇物の水酸化カリウムを賦活剤とした活性炭と同じように高いMB-absを示した。
- 2 炭酸カリウムを賦活剤として電気炉の代わりにガラス細工用バーナーで加熱した炭化・賦活処理でもMB-absの高い活性炭が得られた。

## 文 献

- (1) 熊本進誠ほか：第4回廃棄物学会研究発表会講演論文集，289～293（1993）
- (2) 森田啓次郎ほか：第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集，183～185（1994）
- (3) 新版 活性炭基礎と応用，講談社サイエンティフィック，51～54（1992）
- (4) 森 美由紀ほか：第21回全国都市清掃研究発表会，210～214（2000）
- (5) 室山勝彦，林 順一：ケミカル・エンジニアリング，143～149（1999）

# パソコンによる水質シミュレーションの可能性について — 徳山湾の流動・拡散シミュレーションを例として —

山口県環境保健研究センター

溝田 哲

## The Possibility of Water Quality Simulation with a Personal Computer

— An Example of Simulation in Tokuyama Bay —

Satoshi MIZOTA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Public Health

### はじめに

筆者は、10年前に、海域や湖沼(ダム湖)の水質保全施策の一環として汚濁解析に携わりその方法論の一つとして水質予測モデルによる水質変化数値シミュレーションを行った。シミュレーションシステムは、実務上利用可能であったパソコンで作成した。

パソコンを利用したシミュレーションは、パソコンの性能からくる制約が大きく、モデルの選定や空間計算ステップ(差分格子)などについての精度を犠牲にせざるを得なかった。

当時作成したシミュレーションシステムの一つに二次元単層流動・拡散モデルがある。このモデルで一週間程度の拡散の様子を見るには、12時間以上の計算時間を必要とした。また、差分格子数を多くして空間精度を上げるこ

とも困難であった。したがって、パソコンを用いてこのモデルに実用性を持たせるのは容易ではなく、実務に用いることはなかった。

現在のパソコンの状況を見ると、その性能は飛躍的に向上し、CPUの動作クロックだけを見ても当時の40倍以上である。そこで、10年前に実用的ではなかったシミュレーションシステムが、現在の状況でどの程度の実用性を示すのか、徳山湾の潮流・拡散シミュレーションの例を通して検討し、これからのパソコンを利用したシミュレーションの可能性を探る。

### シミュレーションシステム

#### 1 モデルの選定

潮流計算には、図1に示す二次元単層流動モデル<sup>1)</sup>を

#### 1. 流動方程式

鉛直方向に平均化された二次元流れの方程式は、次のように表せる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fV - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + Ax \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \left[ \frac{\gamma_s^2 u \cdot (u^2 + v^2)^{1/2}}{h + \xi} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fU - g \frac{\partial \xi}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} + Ay \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \left[ \frac{\gamma_s^2 v \cdot (v^2 + u^2)^{1/2}}{h + \xi} \right]$$

$$\begin{aligned} \gamma_s^2 &= g/C^2 \\ C &= (1/n)R^{1/3} \\ n &= 0.026 \text{ (マンニングの粗度係数)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = - \frac{\partial [(h + \xi)u]}{\partial x} - \frac{\partial [(h + \xi)v]}{\partial y}$$

#### 2. 拡散方程式(深さ方向に平均化された)

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(h + \xi)c]}{\partial t} &= - \frac{\partial [(h + \xi)uc]}{\partial x} - \frac{\partial [(h + \xi)vc]}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial [(h + \xi) \cdot K_x \frac{\partial c}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \xi) \cdot K_y \frac{\partial c}{\partial y}]}{\partial y} + H S_a \end{aligned}$$

図1 鉛直方向に平均化された二次元流及び拡散方程式

用い、拡散計算には二次元単層拡散モデル<sup>1)</sup>を用いた。このモデルは、流れを深さ方向に平均化して単層で扱い、水平方向を二次元で計算するものである。

1の運動方程式は潮流現象を記述するものであり、2の拡散方程式は保存性物質の移流拡散現象を記述するものである。ここでは文献<sup>1)</sup>を参考にして、対象領域を図2に示す正方格子で表現する有限差分法(差分法)に基づいて定式化<sup>1)</sup>(一部を図3に例示した)、コンピュータプログラムに記述して計算を行なう。徳山湾を格子分割したものを図4に示す。正方格子の必然性は無いが、計算プログラムの記述や計算の容易性から正方格子を用いた。

2 コンピュータプログラム

(1) 開発環境

利用した開発環境を表1に示す。10年前のシステムは、コンピュータの処理能力が低いことを考慮して可能な限り実用的時間内で計算が行えることを最優先に考えた。

現在のシステムは、10年前のものを表1に示す環境で利用できるように手直したものであるが、計算精度や計算時間など基本的なところの変更はない。

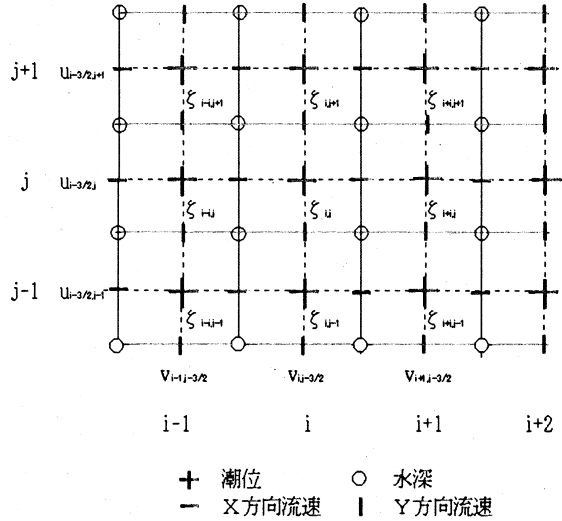


図2 差分格子と各要素の配置

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2, j}^{t+\Delta t} - u_{i+1/2, j}^t}{\Delta t} &= fV^t - g \frac{\zeta_{i+1, j}^{t+\Delta t} - \zeta_{i, j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - u_{i+1/2, j}^t \frac{u_{i+1/2, j}^t - u_{i-1/2, j}^t}{2\Delta x} \\ &\quad - v_{i, j-1/2}^t \frac{u_{i+1/2, j}^t - u_{i+1/2, j-1}^t}{2\Delta y} \\ &\quad + Ax \left( \frac{u_{i+1/2, j}^t - 2u_{i+1/2, j}^t + u_{i-1/2, j}^t}{\Delta x^2} + \frac{u_{i+1/2, j}^t - 2u_{i+1/2, j}^t + u_{i+1/2, j-1}^t}{\Delta y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\gamma u_{i+1/2, j}^t \cdot \left( (u_{i+1/2, j}^t)^2 + (V^t)^2 \right)^{1/2}}{2} \\ &\quad - \frac{1}{2} (h_{i+1/2, j+1/2}^t + h_{i+1/2, j-1/2}^t + \zeta_{i+1, j}^{t+\Delta t} + \zeta_{i, j}^{t+\Delta t}) \\ V^t &= \frac{1}{4} (v_{i+1/2, j+1/2}^t + v_{i+1/2, j-1/2}^t + v_{i-1/2, j+1/2}^t + v_{i-1/2, j-1/2}^t) \end{aligned}$$

図3 運動方程式の差分化の例 (u成分)

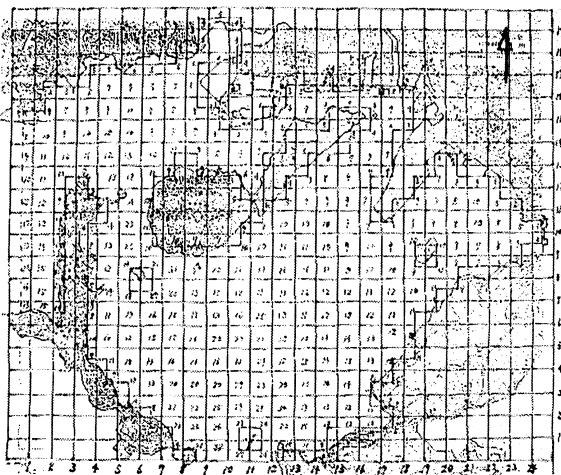


図4 徳山湾の格子分割例

表1 開発環境

		10年前	現在
パソコン	CPU	80386	Pentium III
	クロック	20MHz	750MHz
	RAM	128KB	128MB
	HD	100MB	20GB
OS		MS-DOS	Windows98
プログラム開発言語		N88BASIC <sup>2)</sup>	ActiveBasic <sup>3)</sup>
		MS-FORTRAN <sup>4)</sup>	MS-Visual C <sup>4)</sup>

(2) 計算

10年前は、FORTRANを用いて計算部を作成した。当時のFORTRANは、計算には向くがGUI等の入出力インターフェイスが備わっておらず計算条件等の設定など計算以外の部には不向きであった。GUIを備えたC言語(C)の利用も考えたが、当時のCは計算能力がFORTRANよりも劣る(特に浮動小数点演算において)ということであったので用いなかった。

現在は、MS-Visual Cを用いている。これは、現在のCは計算能力もFORTRANに劣らずGUIも備わっており、かつ日常的に利用している環境なので移植等の作業が容易であること等を考慮したものである。

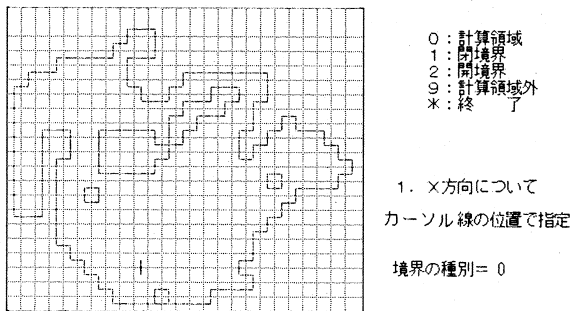


図5 計算格子の設定画面

(3) 条件等の設定

10年前に利用可能な環境であった(Cも利用可能であったが、FORTRANを選んだ為に予算的に利用不可) N88BASICで作成し、全ての条件をコンピュータ画面(画面)上で設定できるようにした。

対象領域の正格子設定例を図5に示す。画面に分割数だけの正格子を描きその格子上を移動するカーソル位置の条件を数値キーで設定(閉境界:1, 開境界:2, 計算域:0, 計算域外:9)することで対象領域を格子分割する。

現在はこれをActiveBasicに移植して用いている。このBasicは、N88BASICを小規模な手直して移植可能なWindows上で動作するBASICコンパイラである。

3. 計算条件

(1) 流動モデル

拡散計算用の計算は、表2に示す空間条件及び境界条件等で行い、計算安定後の一潮汐を視覚化と拡散計算用としてHDに保存した。潮汐調和定数は徳山湾検潮所の潮汐観測データ<sup>3)</sup>の調和解析で求めた。

その他の計算は、表2及び境界強制水位として観測データを用いる条件で行った。

(2) 拡散モデル

表3に示す初期条件及び流入負荷条件と流動条件として潮流計算結果の一潮汐分を用いた。

表2 潮流計算の条件設定

条 件	設 定 値
格子数	X方向 24, Y方向 19
格子間隔	500 m
計算時間ステップ	180 秒
水 深	海図より読み取り.(m)
海底摩擦係数	式1のとおり (R: 平均水深)
境界強制水位	$\zeta = \alpha \sin [(2\pi/T) \cdot t - \theta]$ T: 12時間, $t = n \cdot \Delta t$ X方向境界 $\alpha = 83.4 \text{ cm}, \theta = 227.5 \text{ 度}$ Y方向境界 $\alpha = 83.4 \text{ cm}, \theta = 228.5 \text{ 度}$ (各8月12日観測値より)
初期水位と流速	共に0 (ゼロ)
河川流入	水路部 (A) 2カ所で40 m <sup>3</sup> /秒

表3 拡散計算の条件設定

要 素	設 定 値
計算時間ステップ	360 秒
潮位及び潮流	潮流計算の結果 (3 潮汐目)
拡散係数	2 m <sup>2</sup> /秒 (全域一定)
開境界濃度	流入 0 流出
	$C_{i-1,j}^{t+1} = C_{i-1,j}^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i-1/2,j}^{t+1} \cdot (C_{i,j}^t - C_{i-1,j}^t)$
条件1 初期濃度	全域 0
負荷量 (kg/秒)	水路部 (A) 3カ所 各50
条件2 初期濃度	水路部 (A) 5000 (無単位)
負荷量 (kg/秒)	全域 0
条件3 初期濃度	全域 0
負荷量 (kg/秒)	開境界部 X方向に 0 Y方向に 30 水路部2地点に各0.5

計算結果と考察

1. 計算所要時間

結果を表4に示す。現在のCPUのクロック速度は10年前の40倍弱であるが、総合的な処理速度としては約8,000倍にもなっている。

表4 計算所要時間の比較

	10 年 前	現 在
潮流計算 所要時間	2 潮汐 (24時間) 90分	60 潮汐 (720時間) 20秒
拡散計算 所要時間	2 潮汐 (24時間) 110分	60 潮汐 (720時間) 24秒

## 2 計算による潮流の様子

小潮(8月15日)の結果を図6に, その128潮汐後の結果を図7に示す。中央部にある島の西側の狭さく部(B)の流れが速く, この海域は西側及び南側の開境界から入り込んだ潮の流れによる交換量が大いことがうかがえる。東側のふくらんだ海域(C)の流速は小さく, 流れが停滞していることが推察できる。よって, 陸から水路部(A)へ負荷があるとすると, 東側の流れの遅い海域で停滞することが予想される。また, 水路部から開境界部(D)に近い海域まで拡散してきた負荷は, 開境界部の潮の出入りによって希釈及び外海に搬出されることが予想され, 外海の濃度が水路部よりも高くない限り開境界部の濃度が負荷を受ける水路部よりも高くなることはないことが推測できる。

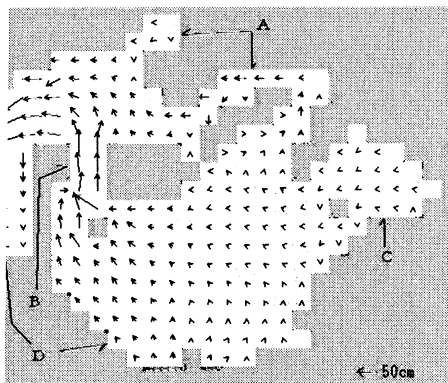


図6 潮流計算結果(小潮:8月15日)

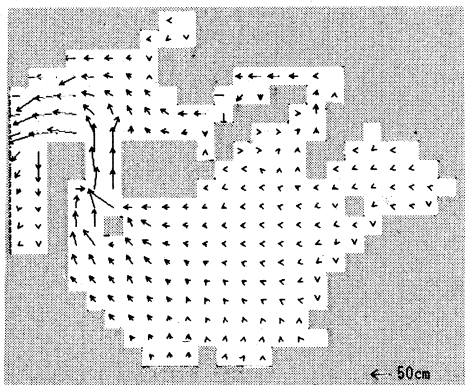


図7 潮流計算結果(大潮:128潮汐後)

今回の潮流計算は, 拡散計算が一潮汐分の潮流データを繰り返し使用する設定であることから, 一定の強制水位を与えて流速ゼロから始めた計算値が安定するまでの数潮汐の計算で良かった。しかし, 長期間の精度良い拡散計算を行う場合には天文学的な潮汐計算を必要とし, 拡散計算期間分の潮流計算が必要となる。

このような長期間の計算は, 10年前の環境では時間的

に困難であったが, 現在では1年間の計算も約4分ででき, 長期間の潮流計算も可能となった。その様子を図7に示した。潮流パターンに大きな違いは見られないが, 流向及び流速の細部に違いが認められる。

## 3. 計算による拡散の様子

70潮汐期間の結果を図8から図10に, 9潮汐期間の結果を図11から図12に示す。図8は, 条件1(表3)による結果である。潮流計算の結果から予想されたように, 濃度分布は水路部から沖合に向けて低くなっている様子が見える。

図9は条件2(表3)による結果である。これも潮流の計算で予想されたように, 水路部の負荷は東側の海域(C)すなわち流速が小さく停滞気味の海域に滞留し, 濃度分布パターンは60潮汐を過ぎるあたりから定常状態に近くなり, その濃度は外海水によって希釈, 搬出され徐々に低濃度になっていく様子が見られる。

図10は, 条件3による計算結果で, 水路部の海域と沖合の境界海域の濃度が同等か沖合の方が高い濃度分布を示す負荷条件を検討した一例である。潮流計算において予想されたように, 外海の濃度が水路部と同程度の条件設定で実現することが出来た。

70潮汐期間の計算は, 10年前では約62時間を要することになる。ここでは, 実働時間として8時間を考え, この時間内で行える9潮汐期間の計算結果を図11及び図12に示した。これをみると, 70潮汐期間計算した結果(図8, 図9)とはかなり異なる濃度分布を示している。条件2の計算結果(図12)では, 濃度分布が定常状態に近くなった現象も認められない。

10年前には, 以上のような長期間の拡散の様子を観ることは計算時間の制約から困難であったが, 現在では実働時間内で可能となった。誇張して言えば, パソコンの処理能力の向上が新たな世界を見せてくれた, とも言える。

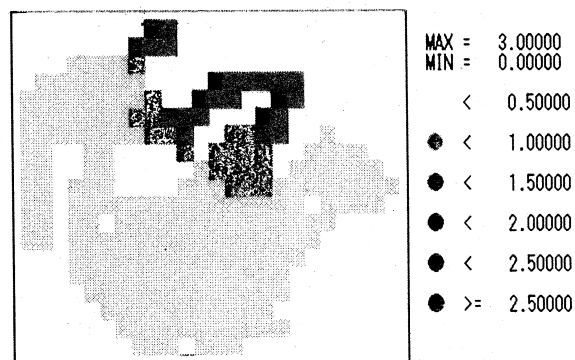


図8 条件1での拡散計算の結果

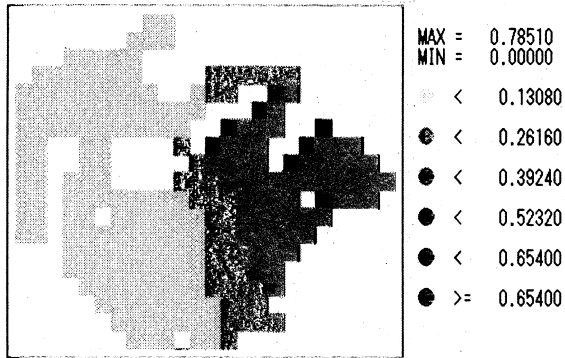


図9 条件2での拡散計算の結果

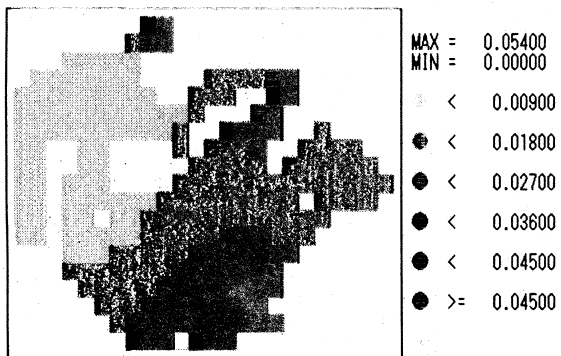


図10 条件3での拡散の結果

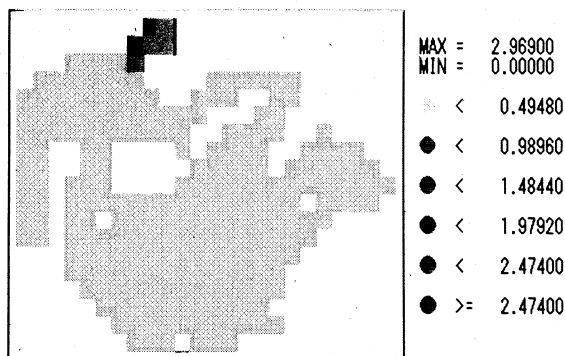


図11 条件1の9潮汐 (CPU時間8時間) の計算結果

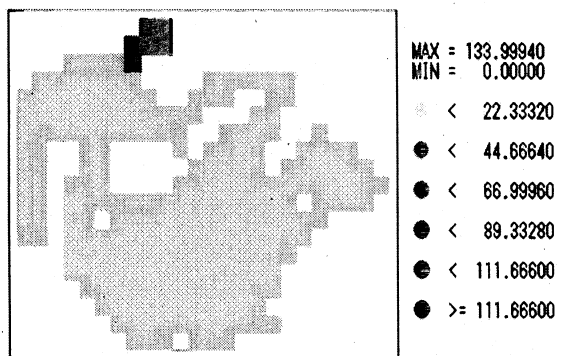


図12 条件2の9潮汐 (CPU時間8時間) の計算結果

#### 4. コンピュータシミュレーションの有用性

以上の結果は二次元単層モデルによる計算結果であるが「一般の海域では水平流が鉛直流に対して卓越しているため平面的な二次元流れによっても流況や物質拡散の大勢を知ることは多くの場合可能である<sup>1)</sup>」と言われていたこともあり、現実の流れや濃度分布の平面的なパターンの大勢はほぼ再現できているものと考えられる。

したがって、今回行った計算結果から相対的な濃度分布の様子を知ることはでき、モニタリングなどで得られた濃度分布の出現する可能性やその条件の探索に利用することは十分可能と考えられる。また、モニタリング調査において、調査地点を選定する場合など、より合理的で合目的な選定を支援する道具としての利用も可能と思われる。内湾海域における調査では、半日周期という潮流変化の為に同時性確保の困難性や、人員の制約から調査地点数や調査頻度の限界もある。コンピュータシミュレーションは、これらを補完する有用で手軽なツールとなり得るものと考えられる。

これらの可能性は、コンピュータシミュレーションが、現実に行うには困難な現場実験などをコンピュータの中で仮想的ではあるが合理的かつ科学的に実現可能とし、許される時間内であればいくらかでも条件を変えて (現実には不可能な条件でも) 実験を行うことが出来るということによるものと言える。

#### 5. これからのパソコンを用いたシミュレーション

##### (1) モデルの選択

これまでは計算時間の制約から、静水圧平衡などの仮定を含む二次元モデルや準3次元モデル (深さ方向に数層を設定: レヤーモデルやレベルモデル) を選択せざるを得なかったが、処理速度の向上からこれらの仮定を取り除いたモデルや対象の規模によっては3次元モデルも選択可能になるものと思われる。ちなみに、現在の環境で空間ステップを1/2にした場合の計算所要時間を単純推定すると約90秒となり、空間ステップを1/2にした3次元モデル (深さ方向5m格子として25m平均水深) の計算所要推定時間は約10分となり、いずれも実利用時間内であると言える。

##### (2) 空間精度

処理速度は今後益々向上することが予想され、格子間隔 (差分格子) もさらに小さくして計算対象の空間形状をより細密に近似することが可能となり、空間精度の向上が望めるものと思われる。



## まとめ

10年前に作成した二次元単層流動・拡散シミュレーションシステム(モデル)は、当時のパソコンの処理能力が低かったために計算に多くの時間を必要とし、実用的ではなく実務で使用することはなかった。

そして今日、パソコンの処理能力の飛躍的な向上は、CPUクロックの単純比較だけでも40倍以上であり、総合的には約8000倍の処理能力を示し、10年前に作成したモデルを実用的なものにすることを可能にした。

処理速度の向上は、モデルを実用的にしたのみでなく、差分格子をさらに小さくすることを可能とし、実際の空間形状をより精度良く再現し、より現実に近いレベルでのシミュレーションを可能にすることが期待できる。さらには、3次元モデルも現実的なものと考えられるまでになっている。

このように、パソコンを用いたシミュレーションは、パソコンの性能向上に伴って成長していると言え、これか

らもパソコンのさらなる性能向上が望めることからシミュレーションもさらに成長できるものと期待できる。

したがって、これからは海域のモニタリングデータの解析や調査の支援、汚濁解析、環境改変の影響事前評価など実務における有効なツールとしての利用可能性が益々増大するものと考えられる。

## 文献等

- 1) 堀江 毅他：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技研資料，360 (1980)
- 2) NEC社のBASICインタープリタ。
- 3) Discoversoft社のBASICインタープリタ&コンパイラ。
- 4) マイクロソフト社のFORTRANおよびCコンパイラ。
- 5) 海上保安庁第六管区海上保安本部海洋情報部Webページ (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/>)

編 集 委 員

宮 村 惠 宣	田 坂 美 和 子
手 島 義 人	有 田 正 義
片 山 淳	山 本 征 治

山口県環境保健研究センター業績報告  
第23号 (2002)

平成15年3月1日 印刷発行

編集発行者 山口県環境保健研究センター

葵 庁 舎 〒753-0215 山口市葵2丁目5-67  
T E L 083-922-7630  
F A X 083-922-7632

大歳庁舎 〒753-0871 山口市朝田535番地  
T E L 083-924-3670  
F A X 083-924-3673